



p-ISSN 2815-648X
p-ISSN 1859-4611
e-ISSN 3030-4717

Tạp chí

KHOA HỌC TÂY NGUYÊN

Tay Nguyen Journal of Science

SÁNG TẠO - CHẤT LƯỢNG - HỘI NHẬP

Tập 20
Số 3
Tháng 06-2026

Vol 20 • No 3, June of 2026

TẠP CHÍ KHOA HỌC TÂY NGUYÊN

TỔNG BIÊN TẬP

PGS.TS. Lê Đức Niêm

PHÓ TỔNG BIÊN TẬP

PGS.TS. Nguyễn Văn Nam

CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG

GS.TS. Nguyễn Anh Dũng

ỦY VIÊN

GS.TS. San-Lang Wang	I Đại học Tamkang, Đài Loan
GS.TS. Lê Thị Thanh Nhân	I Bộ Giáo Dục và Đào tạo
GS.TS. Trương Bá Thanh	I Trường Đại học Kinh tế, Đại học Đà Nẵng
GS.TS. Lê Đức Ngoan	I Trường Đại học Nông lâm, Đại học Huế
GS.TS. Đinh Quang Khiếu	I Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế
GS.TS. Đặng Tuấn Đạt	I Trường Đại học Y Dược Buôn Ma Thuật
PGS.TS. Đặng Hà Việt	I Cục Thể dục Thể thao, Bộ Văn hóa Thông tin và Du lịch
PGS.TS. Đoàn Thị Tâm	I Trường Đại học Sư Phạm Thành phố Hồ Chí Minh
PGS.TS. Buôn Krông Thị Tuyết Nhung	I Trường Đại học Tây Nguyên
PGS.TS. Nguyễn Phương Đại Nguyên	I Trường Đại học Tây Nguyên
PGS.TS. Nguyễn Thị Thanh Hương	I Trường Đại học Tây Nguyên
PGS.TS. Trần Quang Hạnh	I Trường Đại học Tây Nguyên
PGS.TS. Phan Văn Trọng	I Trường Đại học Tây Nguyên

TRƯỞNG BAN THƯ KÝ - PHỤ TRÁCH TRỊ SỰ

TS. Nguyễn Đình Sỹ I Phòng KH&QHQT

THÀNH VIÊN BAN THƯ KÝ

CN. Y Zina Ksor	I Phòng KH&QHQT
ThS. Trần Thị Minh Hà	I Phòng KH&QHQT
KS. Lê Thụy Vân Nhi	I Phòng KH&QHQT
TS. Dương Quốc Huy	I Khoa KHTN&CN

ĐỊA CHỈ TÒA SOẠN

Phòng Khoa học & Quan hệ Quốc tế, trường Đại học Tây Nguyên

567 Lê Duẩn, phường Ea Kao, tỉnh Đắk Lắk, Việt Nam

Điện thoại: (84) 262.3853.276 Fax: (84) 262.3825.184

E-mail: tapchikhoahocdhtn@ttn.edu.vn | Website: <https://tnjos.vn>

p-ISSN 1859-4611 & 2815-648X/ e-ISSN 3030-4717

Giấy phép hoạt động báo chí in số 197/GP-BTTTT,
do Bộ trưởng Bộ Thông tin và Truyền thông cấp ngày 06/6/2023
In 50 quyển, khổ 20x29cm. In tại Công ty TNHH một thành viên In Đắk Lắk,
45 Nguyễn Tất Thành, phường Tân An, tỉnh Đắk Lắk.
In xong và nộp lưu chiểu tháng 06 năm 2026.

THỂ LỆ VIẾT BÀI

1. QUY ĐỊNH VỀ VIỆC GỬI BÀI

Bài viết gửi đến Tạp chí Khoa học Tây Nguyên phải đảm bảo chưa từng được công bố hoặc gửi xét duyệt tại bất kỳ tạp chí, hội thảo hay ấn phẩm thông tin nào khác. Tạp chí chấp nhận bài viết bằng hai ngôn ngữ: **tiếng Việt** và **tiếng Anh**, tùy thuộc vào đối tượng nghiên cứu và phạm vi tiếp cận của tác giả. Tác giả cần đảm bảo rằng nội dung bài viết tuân thủ đúng chuẩn mực đạo đức khoa học, không vi phạm các quy định về đạo văn hay sở hữu trí tuệ.

2. YÊU CẦU VỀ NỘI DUNG BÀI VIẾT

Nội dung bài viết cần đảm bảo tính cô đọng và súc tích, nêu bật được những kết quả nghiên cứu chính yếu. Tạp chí chỉ xét duyệt những bài viết có cấu trúc rõ ràng và phù hợp với tiêu chuẩn của từng loại hình bài báo. Tạp chí Khoa học Tây Nguyên đặc biệt hoan nghênh hai loại bài viết chính như sau:

a. Bài báo nghiên cứu (Research Article):

Là bài viết trình bày kết quả chi tiết của một nghiên cứu nguyên gốc, đóng góp vào lĩnh vực khoa học tương ứng. Cấu trúc chính gồm: **Tóm tắt (Abstract)**: Giới thiệu ngắn gọn mục tiêu, phương pháp, kết quả và kết luận. **Giới thiệu (Introduction)**: Trình bày bối cảnh, tầm quan trọng và mục tiêu nghiên cứu. **Vật liệu và Phương pháp (Materials and Methods)**: Mô tả chi tiết vật liệu (dụng cụ, hóa chất, dữ liệu...) và phương pháp thực hiện để đảm bảo người đọc có thể tái hiện lại. **Kết quả và Thảo luận (Results and Discussion)**: Trình bày kết quả qua số liệu, biểu đồ và đánh giá ý nghĩa, so sánh với các nghiên cứu trước. **Kết luận (Conclusion)**: Tóm tắt kết quả chính và đề xuất hướng nghiên cứu hoặc ứng dụng tiếp theo. **Tài liệu tham khảo (References)**: Danh sách tài liệu trích dẫn theo tiêu chuẩn của tạp chí. Bài báo phải minh bạch, đảm bảo tính khoa học và đóng góp giá trị cho cộng đồng học thuật.

b. Bài viết tổng quan (Review Article):

Bài viết tổng quan tập trung vào việc **tổng hợp và đánh giá** các nghiên cứu đã được công bố, đồng thời phản ánh xu hướng nghiên cứu hoặc các vấn đề đang được cộng đồng quan tâm. Tác giả cần trình bày một cách khách quan, có hệ thống và đảm bảo các quan điểm đưa ra được hỗ trợ bởi bằng chứng khoa học rõ ràng. Phần tổng quan nên cung cấp cái nhìn bao quát về chủ đề, chỉ ra những khoảng trống cần được khai thác trong tương lai.

3. YÊU CẦU VỀ ĐỊNH DẠNG BÀI VIẾT

Bài viết cần được trình bày theo đúng quy định về định dạng của tạp chí trên **khổ giấy A4**, tối đa **10 trang**, và tuân thủ các quy cách sau: **Font chữ**: Times New Roman, cỡ chữ 11, giãn dòng đơn. **Lề**: Trên 2 cm, dưới 2 cm, trái 3 cm, phải 2 cm. **Công thức toán học**: Sử dụng **MS Equation** hoặc **MathType** (đặc biệt cho bài thuộc lĩnh vực Toán học và Vật lý). **Hình ảnh và biểu đồ**: Khuyến khích dùng Word Picture để dễ dàng chỉnh sửa. Việc tuân thủ các yêu cầu này giúp đảm bảo sự thống nhất về hình thức và hỗ trợ quá trình biên tập, phản biện được thực hiện nhanh chóng và hiệu quả.

4. THÔNG TIN LIÊN HỆ

Ở cuối bài viết, tác giả hoặc nhóm tác giả cần cung cấp đầy đủ thông tin liên hệ bao gồm: **họ và tên, địa chỉ công tác hoặc nơi làm việc, số điện thoại và email**. Thông tin này giúp tòa soạn và ban biên tập dễ dàng trao đổi, liên hệ trong quá trình phản biện và chỉnh sửa bài viết nếu cần thiết.

5. THÔNG TIN BỔ SUNG VÀ KINH PHÍ PHẢN BIỆN

Tác giả cần tham khảo thêm các quy định chi tiết về **định dạng bài viết, quy trình phản biện và chi phí liên quan** tại mục **Dành cho tác giả** trên trang web chính thức của tạp chí. Tất cả các bài viết sẽ được biên tập và phản biện chặt chẽ với quy trình phản biện hoàn toàn online để đảm bảo chất lượng học thuật cao nhất trước khi xuất bản.



p-ISSN 1859-4611 & 2815-648X/ e-ISSN 3030-4717
TẠP CHÍ KHOA HỌC TÂY NGUYÊN

Địa chỉ: 567 Lê Duẩn, phường Ea Kao, tỉnh Đắk Lắk, Việt Nam
Điện thoại: (+84) 262.385.3276 - Fax: (+84) 262.385.2184
Email: tapchikhoahocdhtn@ttn.edu.vn
Website: www.tnjos.vn

p-ISSN 1859-4611 & 2815-648X/ e-ISSN 3030-4717
TAY NGUYEN JOURNAL OF SCIENCE

Address: 567 Le Duan, Ea Kao ward, Dak Lak province, Viet Nam
Phone: (+84) 262.385.3276 - Fax: (+84) 262.385.2184
Email: tapchikhoahocdhtn@ttn.edu.vn
Website: www.tnjos.vn



TRƯỜNG ĐẠI HỌC TÂY NGUYÊN
TAY NGUYEN UNIVERSITY

Tạp chí **KHOA HỌC TÂY NGUYÊN**

Tay Nguyen Journal of Science

p-ISSN 1859-4611 & 2815-648X/ e-ISSN 2815-6471

Tập 20 - Số 3, tháng 06 năm 2026
Vol 20 - No 3, June of 2026

MỤC LỤC	TABLE OF CONTENTS	Tr./ pp.
KHOA HỌC NÔNG LÂM NGHIỆP	AGRICULTURAL AND FORESTRY SCIENCES	
1. Tổng quan vai trò của hệ vi sinh vật đối với sức khỏe đất <i>Trần Thị Biên Thùy & Nguyễn Văn Minh</i>	The role of microorganisms in soil health: An overview <i>Tran Thi Bien Thuy & Nguyen Van Minh</i>	1
2. Đặc điểm miền chức năng và biến thiên trình tự protein NANB của <i>Pasteurella multocida</i> type D phân lập từ trâu tại tỉnh Đắk Lắk và so sánh với các chủng type B <i>Nguyễn Văn Thái, Trinh Thị Thu Hằng, Nguyễn Ngọc Đình, Nguyễn Văn Trọng & Vũ Khắc Hùng</i>	Functional domain characteristics and sequence variation of the NANB protein of <i>Pasteurella multocida</i> type D isolated from buffaloes in Dak Lak province and comparison with type B strains <i>Nguyen Van Thai, Trinh Thi Thu Hang, Nguyen Ngoc Dinh, Nguyen Van Trong & Vu Khac Hung</i>	15
3. Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch và chu kỳ phun đến sinh trưởng của khoai tây (<i>Solanum tuberosum</i> L.) trồng khí canh trong điều kiện nhà màng tại Trường Đại học Tây Nguyên <i>Nguyễn Tuấn, Lê Minh Tân, Nguyễn Hữu Kiên & Chung Như Anh</i>	Effects of nutrient solution concentration and spraying interval on the growth of aeroponically grown potato (<i>Solanum tuberosum</i> L.) under greenhouse conditions at Tay Nguyen University <i>Nguyen Tuan, Le Minh Tan, Nguyen Huu Kien & Chung Như Anh</i>	27
KHOA HỌC TỰ NHIÊN VÀ CÔNG NGHỆ	NATURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY	
4. Ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian xử lý nhiệt đến chất lượng cau (<i>Areca catechu</i> L.) sấy khô tại tỉnh Đắk Lắk <i>Trần Thị Thắm Hà, Nguyễn Thị Thoa, Trần Thị Hoàng Anh, Phạm Văn Thao, Võ Thị Thùy Dung, Trương Minh Hằng, Nguyễn Thị Kim Oanh, Nguyễn Thị Thu Thủy, Phan Thanh Bình, Nguyễn Đình Sỹ & Trần Văn Cường</i>	Effects of heat treatment temperature and time on the quality of dried <i>Areca catechu</i> L. nut in Dak Lak province <i>Tran Thi Tham Ha, Nguyen Thi Thoa, Tran Thi Hoang Anh, Pham Van Thao, Vo Thi Thuy Dung, Truong Minh Hang, Nguyen Thi Kim Oanh, Nguyen Thi Thu Thuy, Phan Thanh Binh, Nguyen Dinh Sy & Tran Van Cuong</i>	34
5. Khảo sát pha trễ của quá trình ngưng tụ sợi amyloid – beta bằng mô hình điểm mạng <i>Phạm Ngọc Hà, Nguyễn Thị Mai Trâm & Phùng Nguyễn Thái Hằng</i>	Investigation of the lag phase in amyloid-beta aggregation using a lattice model <i>Phạm Ngọc Hà, Nguyễn Thị Mai Trâm & Phùng Nguyễn Thái Hằng</i>	43
KHOA HỌC SỨC KHỎE	HEALTH SCIENCES	
6. Đặc điểm rối loạn thông khí trên hô hấp ký và các yếu tố liên quan ở bệnh nhân bệnh phổi mạn tính tại Bệnh viện Trường Đại học Tây Nguyên năm 2025 <i>Tổng Nguyễn Bình & Trương Thị Thúy Trinh</i>	Characteristics of ventilatory disorders and associated factors in patients with chronic respiratory disease at Tay Nguyen University's Hospital in 2025 <i>Tong Nguyen Binh & Truong Thi Thuy Trinh</i>	56
7. Tương tác giữa tế bào u và vi mô trường khối u: vai trò của TILs trong cơ chế miễn dịch ở các phân nhóm phân tử ung thư vú <i>Nguyễn Thị Hoàng An, Trần Thị Bích Dân, Lê Thị Thùy Ngân, Trần Thị Thanh Nhân & Nguyễn Công Tâm</i>	Interaction between tumor cells and the tumor microenvironment: the role of TILs in immune mechanisms in molecular subtypes of breast cancer <i>Nguyen Thi Hoang An, Tran Thi Bich Dan, Le Thi Thuy Ngan, Tran Thi Thanh Nhan & Nguyen Cong Tam</i>	62

KHOA HỌC XÃ HỘI VÀ NHÂN VĂN	SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES
8. Xây dựng tiến trình dạy học dự án theo tiếp cận Ethno-STEM cho chủ đề “Nhà dài sinh thái và điện mặt trời” <i>Nguyễn Thị Thanh Phương, Phùng Thị Tố Loan, Dương Thị Thanh Dung & Đặng Việt Anh</i>	Developing an Ethno-STEM project-based learning process on the theme “Ecological longhouse and solar power” <i>Nguyen Thi Thanh Phuong, Phung Thi To Loan, Duong Thi Thanh Dung & Dang Viet Anh</i> 69
9. Empirical investigation of Digital Transformation at Prudential Vietnam <i>Thái Thanh Hà</i>	Nghiên cứu thực nghiệm về chuyển đổi số tại Prudential Việt Nam <i>Thai Thanh Ha</i> 78
10. Thực trạng tình hình việc làm sinh viên tốt nghiệp của Trường Đại học Tây Nguyên giai đoạn 2023 – 2025, giải pháp nâng cao tỷ lệ việc làm của sinh viên tốt nghiệp <i>Huỳnh Văn Quốc & Lý Ngọc Tuyên</i>	The current employment situation of graduates from Tay Nguyen University in the 2023 – 2025 period, and proposed solutions to improve graduate employment rates <i>Huynh Van Quoc & Ly Ngoc Tuyen</i> 87
11. Chứng nhận bền vững giúp cải thiện năng suất hay mở rộng quy mô sản xuất? Bằng chứng từ các hệ thống cà phê chứng nhận tại Tây Nguyên, Việt Nam <i>Phan Thị Thúy & Lê Thị Hoàng Oanh</i>	Does sustainability certification improve productivity or expand production scale? Evidence from certified coffee systems in Vietnam’s central highlands <i>Phan Thi Thuy & Le Thi Hoang Oanh</i> 93
12. Tổ chức ngày hội STEM trong các trường phổ thông theo định hướng phát triển năng lực học sinh <i>Đinh Thị Xuân Thảo & Mai Đường Thế Huy</i>	STEM festival organization in general education schools for student competency development <i>Dinh Thi Xuan Thao & Mai Duong The Huy</i> 102

TỔNG QUAN VAI TRÒ CỦA HỆ VI SINH VẬT ĐỐI VỚI SỨC KHOẺ ĐẤT

Trần Thị Biên Thùy¹, Nguyễn Văn Minh¹

Ngày nhận bài: 24/09/2025; Ngày phản biện thông qua: 17/06/2026; Ngày duyệt đăng: 18/06/2026

TÓM TẮT

Sức khỏe đất chỉ khả năng của đất có thể duy trì các chức năng quan trọng trong hệ sinh thái. Các yếu tố sinh học là chìa khóa để thực hiện các chức năng trong hệ sinh thái. Hệ vi sinh vật đất giữ vai trò trung tâm, điều phối các dòng vật chất và năng lượng, đồng thời tham gia trực tiếp vào các quá trình sinh học quan trọng trong đất, nhờ các hoạt động của vi sinh vật có lợi trong đất mà các chức năng sinh thái, môi trường và miễn dịch của đất được duy trì. Bài viết này trình bày vai trò quan trọng của vi sinh vật có lợi đối với sức khỏe đất trên cơ sở phân tích các quá trình sinh học như chu trình carbon, vòng tuần hoàn và chuyển hoá chất dinh dưỡng trong đất, ổn định kết cấu đất, kiểm soát sâu bệnh hại, kiểm soát ô nhiễm đất, v.v. Những phân tích này góp phần làm rõ cơ sở lý luận và thực tiễn về vai trò của vi sinh vật đất trong quản lý sức khỏe đất.

Từ khóa: chức năng, sức khỏe đất, vi sinh vật có lợi.

1. MỞ ĐẦU

“Sức khỏe đất” được hiểu là khả năng của đất duy trì các chức năng chủ chốt của hệ sinh thái, góp phần hỗ trợ sản xuất nông nghiệp bền vững (Doran et al., 2000; Karlen et al., 2001). Bên cạnh các thuộc tính vật lý và hóa học, yếu tố sinh học - đặc biệt là cộng đồng vi sinh vật đất được xem là nhân tố trung tâm điều phối các dòng vật chất và năng lượng trong hệ sinh thái đất, qua đó định hình sinh trưởng cây trồng, lưu trữ carbon hữu cơ (SOC), điều tiết phát thải khí nhà kính (CO_2 , N_2O , CH_4), cung cấp dinh dưỡng, duy trì đa dạng sinh học và kiểm soát ô nhiễm môi trường (Montanarella et al., 2015; Nazir et al., 2024, Nguyễn Ngọc Quỳnh và cs., 2019). Do phản ứng nhanh với những biến động của môi trường, vi sinh vật đất vừa là tác nhân thực hiện các chức năng sinh thái, vừa là chỉ thị sinh học nhạy cảm phản ánh trạng thái sức khỏe của đất (Zhu et al., 2021).

Việc hiểu rõ mối quan hệ giữa cộng đồng vi sinh vật đất và các chức năng hệ sinh thái là cơ sở quan trọng cho quản lý sức khỏe đất theo hướng bền vững. Bài viết này tổng quan và phân tích các cơ chế sinh học chủ yếu mà vi sinh vật có lợi tham gia trong hệ sinh thái đất, bao gồm qvai trò của chúng trong cố định carbon, chuyển hoá các chất dinh dưỡng trong đất, sự hình thành và ổn định kết cấu đất, và xử lý các chất ô nhiễm môi trường. Những phân tích này góp phần bổ sung cơ sở lý luận và khoa học cho việc đánh giá, bảo tồn và nâng cao sức khỏe đất trong các hệ thống sản xuất nông nghiệp bền vững.

2. NỘI DUNG

2.1. Vi sinh vật tham gia điều tiết chu trình car-

bon trong đất

2.1.1 Phân giải, đồng hoá và tích lũy carbon hữu cơ thông qua hoạt động của vi sinh vật đất

Vi sinh vật đất là tác nhân sinh học quan trọng tham gia điều tiết chu trình carbon thông qua các quá trình phân giải chất hữu cơ, đồng hoá carbon vào sinh khối và hình thành tàn dư vi sinh vật (necromass) (Trần Viết Cường và cs., 2018). Phần necromass này được tích lũy ổn định trong đất thông qua liên kết với khoáng vật và cấu trúc viên đất, qua đó góp phần hình thành và duy trì các kho carbon hữu cơ bền vững (SOC).

Carbon hữu cơ trong đất là một trong những chỉ số quan trọng phản ánh sức khỏe của đất. Có rất nhiều yếu tố tác động đến khả năng lưu trữ carbon trong đất nông nghiệp (Lê Đình Cường và cs., 2022), trong đó vi sinh vật điều tiết cân bằng carbon thông qua quá trình đồng hóa và phân giải chất hữu cơ. Enzyme ngoại bào do vi sinh vật tiết ra xúc tác quá trình thủy phân và khoáng hóa chất hữu cơ, chuyển carbon hữu cơ thành dạng khoáng và giải phóng CO_2 . Lượng CO_2 sinh ra từ quá trình vi sinh vật phân giải đóng góp đáng kể vào quá trình hô hấp đất, có thể chiếm tới 50% tổng lượng CO_2 phát thải từ đất (dao động theo điều kiện đất - cây - khí hậu). Sự mất cân bằng về nguồn cơ chất và nhu cầu dinh dưỡng của vi sinh vật là nguyên nhân thúc đẩy vi sinh vật tiết ra enzym ngoại bào phân giải carbon hữu cơ. Bổ sung phân đạm vào đất có thể làm thay đổi hoạt tính của các enzyme ngoại bào (Extracellular Enzyme Activity – EEA) liên quan đến chu trình carbon. Theo Jian et al. (2016), bổ sung N làm tăng 12,8% hoạt tính các enzyme thủy phân tham gia phân giải các poly-

¹Khoa Nông Nghiệp, Trường Đại học Tây Nguyên;

²Tác giả liên hệ: Trần Thị Biên Thùy; Email: bienthuuy@ttn.edu.vn.

saccharide đơn giản, nhưng làm giảm 11,9% hoạt tính các enzyme oxy hóa liên quan đến phân giải các hợp chất cao phân tử phenolic phức tạp. Minh chứng này cho thấy việc quản lý đầu vào N có thể ảnh hưởng đáng kể đến quá trình tích lũy SOC và phát thải C từ đất.

Đặc điểm sinh lý của cá thể vi sinh vật và đặc điểm sinh thái quần thể vi sinh vật trực tiếp điều tiết chức năng của quần thể vi sinh vật, từ đó ảnh hưởng đến quá trình khoáng hoá carbon (Wang et al., 2021). Enzym ngoại bào do vi sinh vật tiết ra liên tục biến đổi chất hữu cơ khó phân giải thành các phân tử nhỏ, các phân tử nhỏ này được vi sinh vật hấp thụ sử dụng, cuối cùng chuyển hoá thành tàn dư vi sinh vật (xác vi sinh vật và chất bài tiết của vi sinh vật), bằng cách này đã đóng góp 50-80% lượng carbon hữu cơ cho đất (Liang et al., 2019; Liang et al., 2021). Sự biến đổi của khí hậu, các biện pháp quản lý canh tác và các yếu tố khác đã làm cho carbon hữu cơ thay đổi, sự thay đổi này có mối quan hệ với hiệu suất sử dụng carbon (Wang et al., 2021; Wu et al., 2022). Mặt khác, sự đa dạng và thành phần quần thể vi sinh vật là yếu tố then chốt ảnh hưởng đến hiệu suất sử dụng carbon, sự gia tăng đa dạng vi sinh vật thường có xu hướng làm tăng hiệu suất sử dụng carbon (Kallenbach et al., 2016). Bên cạnh đó, vẫn tồn tại tranh luận về đóng góp cụ thể của từng nhóm vi sinh vật đến hiệu suất sử dụng carbon và carbon hữu cơ trong đất (Kallenbach et al., 2016; Feng et al. 2022). Quần thể vi sinh vật mà trong đó vi khuẩn chiếm ưu thế thì có hiệu suất sử dụng carbon và carbon hữu cơ trong đất cao (Kallenbach et al., 2016), tuy nhiên cũng có nghiên cứu cho rằng, sự khác biệt về quần thể vi sinh vật ảnh hưởng không lớn đến hiệu suất sử dụng carbon (Feng et al. 2022). Mặc dù đã có nhiều bằng chứng về vai trò của vi sinh vật trong tích lũy carbon hữu cơ đất, cơ chế đóng góp của của từng nhóm vi sinh vật và mối liên hệ giữa cấu trúc quần xã, hiệu suất sử dụng carbon và sự hình thành SOC bền vững vẫn chưa được làm sáng tỏ hoàn toàn. Đây là hướng nghiên cứu cần được tiếp tục quan tâm trong tương lai.

2.1.2. Cố định carbon tự dưỡng của vi sinh vật trong đất

Vi sinh vật tự dưỡng trong đất đóng vai trò quan trọng trong chuyển hóa CO₂ thành carbon hữu cơ, có tác dụng tăng cường dự trữ carbon hữu cơ trong đất. Ước tính lượng carbon cố định hàng năm từ vi sinh vật tự dưỡng ở đất rừng, đất khô hạn và đất lúa nước lần lượt đạt 142-194, 128-174 và 536-731 kg C.ha⁻¹.năm⁻¹, với 74% lượng carbon này được tổng hợp vào các kho carbon hữu cơ bền vững dao động theo hệ sinh thái, phương pháp và thời gian

theo dõi (Xiao et al., 2021; Chen et al., 2021). Các con đường cố định carbon tự dưỡng chính bao gồm chu trình Calvin – Benson - Bassham, chu trình axit citric ngược (Reverse Tricarboxylic Acid cycle, Rtca), chu trình 3-Hydroxypropionate/4-hydroxybutyrate (3-HP/4-HB), chu trình dicarboxylate/4-hydroxybutyrate (DC/4-HB), và chu trình WL (Wood-Ljungdahl pathway). Đồng thời, ứng dụng kỹ thuật chỉnh sửa gen trong nghiên cứu quá trình cố định Carbon tự dưỡng đã tìm hiểu về mối quan hệ giữa hiệu suất cố định carbon tự dưỡng với sự phân bố quần thể vi sinh vật. Bằng công nghệ đánh dấu phân tử, các gen đánh dấu như *cbbL/cbbM* trong chu trình Calvin, các gen *aclA* và *korA/B* trong chu trình rTCA, gen *hcd* trong chu trình 4-HB, gen *atoB* trong chu trình 3-HP/4-HB được sử dụng để phản ánh khả năng cố định Carbon tự dưỡng (Huang et al., 2022). Hiệu suất cố định carbon của vi sinh vật tự dưỡng trong đất phụ thuộc vào độ phong phú, đa dạng của vi sinh vật tự dưỡng, mạng lưới cộng sinh của vi sinh vật tự dưỡng và các yếu tố phi sinh học trong đất như độ ẩm, pH, Hàm lượng lân tổng số, độ dẫn điện (EC), tỷ lệ C:N và các yếu tố khác. Những yếu tố môi trường chính ảnh hưởng đến khả năng cố định CO₂ tự dưỡng của vi sinh vật đất cũng đã được quan tâm nghiên cứu. Tuy nhiên, do sự khác biệt về đặc tính lý, hóa và sinh học của từng loại đất, thành phần quần xã vi sinh vật tự dưỡng cũng như mức độ đóng góp của chúng vào quá trình cố định carbon có thể khác nhau đáng kể giữa các hệ sinh thái. Vì vậy, cần tiếp tục nghiên cứu cơ chế hoạt động, khả năng thích nghi và vai trò tương đối của từng nhóm vi sinh vật cố định CO₂ trong điều kiện môi trường đất phức tạp nhằm làm rõ hơn đóng góp của chúng đối với quá trình tích lũy carbon hữu cơ trong đất (Li et al., 2021).

2.2. Vi sinh vật đất tham gia điều tiết chu trình dinh dưỡng trong đất

2.2.1. Vi sinh vật đất tham gia chu trình nitơ trong đất

Nitơ dễ tiêu là một trong những chỉ tiêu quan trọng để đánh giá chất lượng đất. Các quá trình chuyển hóa nitơ trong đất có ảnh hưởng lớn đến hiệu suất sử dụng nitơ dễ tiêu và hiệu suất sử dụng phân đạm. Hiện nay, lượng cố định nitơ bằng con đường sinh học (Biological nitrogen fixation, BNF) trong hệ sinh thái nông nghiệp ước đạt khoảng 50-70 Tg N mỗi năm (Herridge et al., 2008). Nguồn nitơ chính đến từ quá trình cộng sinh cố định nitơ giữa cây họ đậu và vi khuẩn nốt sần. Ngoài con đường cộng sinh, nitơ còn được bổ sung vào đất thông qua hoạt động cố định nitơ của các vi sinh vật sống tự do như vi khuẩn lam *Cyanobacteria*, *Azotobacter*

chroococcum và *Clostridium prazmowski*. Sự thay đổi quần thể vi khuẩn cố định nitơ là yếu tố chính ảnh hưởng đến sự thay đổi của quá trình cố định nitơ sinh học. Việc bón nhiều phân đạm có thể phá vỡ mối quan hệ cộng sinh giữa vi khuẩn nốt sần và cây họ đậu, ức chế chức năng cố định nitơ bằng con đường sinh học trong đất (Lin et al., 2018). Trong khi đó, thông qua công nghệ gen điều tiết chỉnh sửa gen *nif* mã hoá enzyme cố định nitơ (nitrogenase) có thể tối ưu hóa khả năng cố định nitơ của vi sinh vật trong điều kiện có nguồn nitơ ngoại sinh (Bloch et al., 2020). Bên cạnh đó, bổ sung chất hữu cơ giúp tăng hàm lượng chất hữu cơ trong đất, tạo điều kiện thuận lợi cho vi khuẩn cố định nitơ phát triển và thúc đẩy quá trình cố định nitơ sinh học (Charyulu et al., 1981). Do đó, điều chỉnh quần thể vi sinh vật đất thông qua biện pháp bón phân hoặc công nghệ gen có thể làm tăng BNF. Sau khi N_2 được chuyển hóa thành NH_3 thông qua quá trình cố định nitơ sinh học, quá trình oxy hóa amôn do vi khuẩn cố oxy hoá amoniac (*Ammonia-Oxidizing Archaea*, AOA) và (*Ammonia-Oxidizing Bacteria*, AOB) cùng quá trình oxy hóa nitrit do vi khuẩn nitrat hóa sẽ chuyển hóa NH_3 thành NO_3^- (Kuyper et al., 2018). Nitrat có thể bị rửa trôi hoặc chuyển hóa thành N_2 thông qua phản nitrat hóa. Tuy nhiên, quá trình nitrat hóa không hoàn toàn và phản nitrat hóa không hoàn toàn đều tạo ra sản phẩm phụ là khí nhà kính N_2O (Hink et al., 2017). AOA tạo ra ít N_2O hơn AOB trên mỗi mol amôn được oxy hóa (Bakken et al., 2020) do đó sự phân bố sinh thái giữa AOA và AOB ảnh hưởng đến phát thải N_2O . Sự thay đổi tỷ lệ AOA:AOB có thể ảnh hưởng đến phát thải N_2O từ đất, mặc dù mức độ tác động còn phụ thuộc vào điều kiện đất và hệ sinh thái cụ thể. Ngoài ra, mạng lưới phức tạp gồm các quá trình vi sinh và phi sinh học khác cũng tác động đến phát thải N_2O . Vi sinh vật phản nitrat hóa có thể tạo ra N_2O , trong khi các vi sinh vật mang enzyme khử N_2O (mã hóa bởi gen *nosZ*) có khả năng khử N_2O thành N_2 . Sự suy giảm phát thải N_2O có liên quan đến sự tăng cường của gen *nosZ* (You et al., 2022). Do đó, các biện pháp kỹ thuật canh tác như bón phân đạm hợp lý, bón phân hữu cơ có tỷ lệ C/N thấp, quản lý độ ẩm đất hợp lý giúp tối ưu hóa và tăng cường quần thể vi sinh vật nhánh *nosZII* là giải pháp quan trọng để giảm phát thải N_2O từ đất trồng (Wang et al., 2021). Cần chú trọng bón phân đạm hợp lý, quản lý tưới tiêu hợp lý, bổ sung chất hữu cơ cho đất, trồng cây che phủ đất đặc biệt là cây họ đậu, làm đất tối thiểu, chọn giống cây có hiệu suất sử dụng nitơ cao nhằm hạn chế phát thải N_2O từ đất. DNRA (dissimilatory nitrate reduction to ammonium) là quá trình khử NO_3^- thành NH_4^+ theo con đường dị hóa, qua đó

giữ nitơ trong hệ đất ở dạng NH_4^+ thay vì mất đi dưới dạng khí. DNRA ưu thế khi NO_3^- thấp, tỷ lệ C:N cao và điều kiện yếm khí vừa/khử (Coskun et al., 2017). Nhìn chung, việc quản lý cộng đồng vi sinh vật đất và các điều kiện môi trường chi phối các quá trình BNF, nitrat hóa, phản nitrat hóa và DNRA có ý nghĩa quan trọng trong việc nâng cao hiệu quả sử dụng nitơ, giảm thất thoát dinh dưỡng, hạn chế phát thải N_2O và duy trì sức khỏe đất theo hướng nông nghiệp bền vững.

2.2.2. Vi sinh vật tham gia điều tiết lân hữu hiệu trong đất

Lân là một trong những nguyên tố dinh dưỡng thiết yếu đối với cây trồng và là chỉ tiêu quan trọng phản ánh độ phì nhiêu cũng như sức khỏe đất. Trong môi trường đất, lân tồn tại dưới cả dạng hữu cơ và vô cơ; tuy nhiên phần lớn lân bị giữ ở dạng các hợp chất khó tan hoặc bị hấp phụ mạnh lên bề mặt khoáng sét và oxit Fe, Al, làm hạn chế khả năng hấp thu của cây trồng. Vi sinh vật đất đóng vai trò trung tâm trong việc điều tiết tính hữu hiệu của lân thông qua các quá trình hòa tan, khoáng hóa, hấp thu và vận chuyển lân trong hệ sinh thái đất (Phạm Thị Miên và cs., 2021; Yao et al., 2018).

Các vi sinh vật tham gia chu trình lân thông qua ba cơ chế sau:

(1) Hòa tan lân vô cơ

Trong đất giàu lân khoáng, quá trình hòa tan là yếu tố chính thúc đẩy sự luân chuyển lân do vi sinh vật. Cơ chế được giải thích như sau: (i) Các axit hữu cơ do rễ cây và vi sinh vật tiết ra như gluconic acid, oxalic acid, citric acid, malic acid, acetic acid,... có xu hướng tạo phức với các cation (Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}) vốn đang được giữ chặt trong hợp chất cố định với phosphate từ đó giải phóng ion phosphate tự do ($H_2PO_4^-/HPO_4^{2-}$). (ii) Trong quá trình hấp thu và đồng hóa NH_4^+ , rễ cây hoặc vi sinh vật có thể giải phóng H^+ vào vùng rễ, làm giảm pH cục bộ và tăng khả năng hòa tan các khoáng phosphate khó tan. (iii) Vi sinh vật tiết siderophore để thu nhận sắt. Khi siderophore tạo phức với Fe^{3+} trong các khoáng phosphate sắt, cấu trúc khoáng bị phá vỡ, giải phóng các ion phosphate tự do. Đồng thời Siderophore còn cạnh tranh hiệu quả với phosphate để liên kết với Fe^{3+} , giúp ion phosphate được huy động tốt hơn trong đất (Sharma et al., 2013; Rodriguez et al., 2006).

Trong điều kiện đất ngập nước, Fe^{3+} bị khử thành Fe^{2+} , giúp giải phóng ion Phosphate vào dung dịch đất. Khi đất khô ráo hoặc có oxy xâm nhập trở lại, Fe^{2+} oxy hóa thành Fe^{3+} tạo kết tủa với phosphate. Việc kiểm soát chế độ nước (ngập/khô xen kẽ) có thể được tận dụng để điều tiết phos-

phate sẵn có trong đất cung cấp cho cây trồng tại các thời điểm sinh trưởng then chốt.

Nhìn chung, sự gia tăng tính hữu hiệu của lân trong đất là kết quả của sự tương tác giữa các quá trình sinh học, hóa học và oxy hóa – khử, trong đó hoạt động của vi sinh vật và vùng rễ thực vật giữ vai trò trung tâm trong việc huy động các dạng lân khó tan thành dạng cây trồng có thể hấp thụ.

(2) Khoáng hóa lân hữu cơ

Các vi sinh vật mang gen mã hóa enzyme phân giải phosphat như *phoC*, *phoN*, *ophA*, *olpA*, *phoD*, *phoA*, *appA* và *phnJ* có khả năng phân giải lân ở dạng hữu cơ thành lân ở dạng khoáng. Trong đất, enzym phân giải lân tính kiềm (alkaline phosphatase, ALP) chủ yếu được ghi nhận liên quan đến gen *phoD*, và trong điều kiện thiếu lân, gen *phoD* có xu hướng được tăng cường và hoạt tính của ALP tăng lên. Các loài vi sinh vật trong quần thể vi sinh vật mang gen *phoD* có tác dụng giúp khoáng hóa lân hữu cơ thành lân vô cơ (Wei et al., 2019). Ngoài ra, hàm lượng carbon dễ phân hủy, pH và tỷ lệ nguyên tố (C:N:P) cũng ảnh hưởng đến gen *phoD* và cấu trúc quần thể vi sinh vật trong đất trồng (Dai et al., 2020). Thông qua điều tiết ALP có thể cải thiện lân hữu hiệu trong đất trồng.

Hoạt tính ALP chịu ảnh hưởng mạnh bởi pH đất, nguồn carbon dễ phân hủy, hàm lượng lân hữu hiệu và cấu trúc quần xã vi sinh vật. Do đó, các biện pháp quản lý đất nhằm duy trì điều kiện thuận lợi cho hoạt động của phosphatase có thể góp phần nâng cao khả năng khoáng hóa lân hữu cơ trong đất.

(3) Hấp thụ và vận chuyển lân

Sự hiện diện của các gen *pit*, *PstSCAB* và *ugpB/C* giúp vi sinh vật có thể sử dụng hiệu quả lân ở dạng vô cơ và hấp thụ lân trong cơ thể vi sinh vật. Các gen mã hóa bộ vận chuyển phosphate ái lực cao (*pstSCAB*) và gen mã hóa bộ vận chuyển phosphate ái lực thấp (*pit*) đóng vai trò quan trọng trong việc thúc đẩy quá trình hấp thụ lân do vi sinh vật đảm nhiệm trong điều kiện thiếu hoặc đủ lân (Oliverio et al., 2020). Mức độ biểu hiện của gen mã hóa hấp thụ phosphate ái lực cao ở vi sinh vật có mối tương quan thuận với độ hữu hiệu thấp của lân trong đất (Bergkemper et al., 2016).

Nấm rễ cộng sinh AMF (Arbuscular Mycorrhizal Fungi) đóng vai trò then chốt trong việc mở rộng vùng hấp thụ lân (P) và vận chuyển lân đến rễ cây. Hệ sợi nấm AMF phát triển mạnh mẽ trong đất tạo ra một mạng lưới hấp thụ khổng lồ, hiệu quả hơn nhiều so với lông hút của rễ. Các sợi nấm mảnh có kích thước 2-20 μm có thể len lỏi vào các khe đất nhỏ nhất để tìm kiếm và hấp thụ các ion photphat (H_2PO_4^-) di động chậm trong

đất. Sau khi hấp thụ, lân được vận chuyển nhanh chóng bên trong hệ sợi nấm dưới dạng polyphosphate. Khi đến vùng rễ, tại cấu trúc trao đổi chuyên biệt gọi là arbuscule (bên trong tế bào vỏ rễ), lân được chuyển giao cho tế bào cây chủ. Ngược lại cây cung cấp cho nấm carbon (đường) từ quang hợp, tạo thành mối quan hệ cộng sinh cùng có lợi, cơ chế này đặc biệt quan trọng trong điều kiện đất nghèo dinh dưỡng hoặc khô hạn.

Bổ sung nitơ vào đất có thể làm giảm khả năng hòa tan và khoáng hóa lân của vi sinh vật, trong khi bón lân vào đất làm thay đổi phân bố chức năng của vi sinh vật, có lợi cho quá trình hấp thụ và tích lũy lân trong sinh khối vi sinh vật (Dai et al., 2020). Xem xét từ góc độ vi sinh vật về khoáng hóa lân hữu cơ, hoạt hóa lân vô cơ và cố định lân nhờ vi sinh vật có thể cung cấp lý luận nhằm điều tiết chu trình lân trong hệ sinh thái nông nghiệp bền vững. Nhìn chung, các quá trình hòa tan lân vô cơ, khoáng hóa lân hữu cơ, hấp thụ và vận chuyển lân do vi sinh vật điều khiển có vai trò quyết định đối với tính hữu hiệu của lân trong đất. Hiểu rõ các cơ chế này sẽ góp phần xây dựng các giải pháp quản lý dinh dưỡng và sức khỏe đất theo hướng nông nghiệp bền vững.

2.3. Vi sinh vật thúc đẩy hình thành và ổn định kết cấu đất

Kết cấu đất tốt tạo điều kiện cho rễ phát triển, giảm xói mòn, giữ nước, dinh dưỡng và tăng lưu trữ carbon. Ở cấp vi mô, kích thước viên đất và đoàn lap quyết định phân bố, đa dạng và chức năng của cộng đồng vi sinh vật (Wilpiseski et al., 2019). Ngược lại, vi sinh vật là lực lượng sinh học then chốt khởi tạo và duy trì đoàn lap thông qua nhiều cơ chế; SOM/SOC, đặc biệt là necromass vi sinh, đóng vai trò nguyên liệu và chất kết dính quan trọng (Zhu et al., 2020). Đất ở trạng thái có kết cấu sẽ hỗ trợ sự phát triển của rễ cây, chống xói mòn đất, có khả năng lưu trữ carbon và giữ nước. Đất ở trạng thái có kết cấu tốt là nền tảng tốt đảm bảo cho các điều kiện sinh trưởng phát triển của cây trồng. Đất có kết cấu sẽ tạo môi trường thuận lợi cho các loại vi sinh vật khác nhau tồn tại trong đất. Trong đất, kích thước đoàn lap sẽ ảnh hưởng đến sự phân bố, số lượng, sự đa dạng và chức năng của vi sinh vật (Wilpiseski et al., 2019). Ngoài ra, vi sinh vật cũng là yếu tố sinh học quan trọng góp phần vào việc hình thành đoàn lap. Chất hữu cơ trong đất là yếu tố chính thúc đẩy sự hình thành và ổn định của đoàn lap, trong khi vi sinh vật và xác vi sinh vật là thành phần quan trọng của carbon hữu cơ trong đất (Zhu et al., 2020). Như vậy có thể thấy đặc tính vật lý của đất có mối quan hệ chặt chẽ với vi sinh vật trong đất. Cây đất đồng ruộng

vào đất khử trùng làm tăng đáng kể độ ổn định của đoàn lạp ở đất có cấu trúc ban đầu kém do tác dụng tiết enzym ngoại bào phân giải chất hữu cơ và giúp tổng hợp mùn, từ đó các phần tử cơ giới đất được gắn kết bởi mùn, tạo thành đoàn lạp đất (Merio et al., 2021), chứng minh vai trò quan trọng của vi sinh vật đất trong việc hình thành kết cấu đất. Vi sinh vật đất thúc đẩy sự hình thành đoàn lạp thông qua nhiều cách: (1) tế bào vi sinh vật dựa vào lực hút tĩnh điện tự thân để kết nối các hạt đất; (2) hợp chất ngoại bào (Extracellular polymeric substances, EPSs) được tiết ra từ vi sinh vật có thể kết dính các hạt đất với nhau; (3) sợi nấm và sợi xạ khuẩn quấn chặt các hạt đất một cách cơ học (Coban et al., 2022). Do sự phân bố không đồng nhất của vi sinh vật trong đoàn lạp đất, các quần thể vi sinh vật thực hiện các chức năng riêng biệt nhưng phối hợp với nhau để điều chỉnh sự hình thành đoàn lạp. Thông thường, nấm được cho là có lợi hơn cho sự hình thành đoàn lạp lớn, trong khi vi khuẩn và các sản phẩm trao đổi chất của chúng có lợi hơn cho sự hình thành đoàn lạp nhỏ. Các đường đa (polysaccharide) ngoại bào do vi khuẩn và nấm tiết ra đóng vai trò quan trọng trong việc ổn định đoàn lạp nhỏ trong đất, nó hoạt động như chất kết dính thúc đẩy sự hình thành đoàn lạp nhỏ của đất (Deng et al., 2015). Các đoàn lạp nhỏ liên kết với nhau, tham gia hình thành các đoàn lạp lớn ổn định (Olagoke et al., 2022). Protein đất liên quan đến glomalin (Glomalin-Related Soil Protein, GRSP) do nấm rễ nội cộng sinh AMF tạo ra đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành và ổn định đoàn lạp đất (Rillig et al., 2004). Do những đóng góp khác nhau của vi sinh vật đất đối với sự hình thành đoàn lạp đất, cần xem xét đến tính hỗ trợ giữa các cơ chế hình thành đoàn lạp đất. Đa dạng sinh học và tương tác giữa các loài vi sinh vật đất là chìa khóa cho sự hình thành và ổn định đoàn lạp đất (Lehmann et al., 2017). Mặc dù vai trò của vi khuẩn và nấm trong sự hình thành và ổn định đoàn lạp đất đã được công nhận, nhưng còn rất ít nghiên cứu về ứng dụng vi sinh vật để cải thiện cấu trúc đất. Do đó, cần tiếp tục nghiên cứu mối quan hệ giữa đa dạng sinh học vi sinh vật, mạng lưới tương tác sinh học và các cơ chế hình thành đoàn lạp nhằm xây dựng các giải pháp quản lý đất bền vững dựa trên nền tảng sinh học.

2.4. Vai trò của vi sinh vật đất trong tăng cường khả năng chống chịu stress và kích hoạt cơ chế bảo vệ thực vật

Vi sinh vật đất đóng vai trò quan trọng trong việc chống chịu các áp lực sinh học và phi sinh học. Các vi sinh vật có lợi trong đất có thể nâng cao khả năng kháng bệnh của đất thông qua cạnh

tranh sinh thái và dinh dưỡng, sản xuất chất đối kháng, ký sinh, săn mồi, kích hoạt miễn dịch cảm ứng ở thực vật và can thiệp làm nhiễu tín hiệu gây bệnh của vi sinh vật gây bệnh. Một số nghiên cứu cho thấy việc bổ sung *Bacillus* có thể thúc đẩy các tương tác thuận lợi với quần thể *Pseudomonas* bản địa vùng rễ, qua đó tăng cường khả năng ức chế mầm bệnh và bảo vệ cây trồng (Tao et al., 2020). Do đó, vi sinh vật đất có khả năng tăng cường khả năng kháng bệnh của đất và nâng cao sức khỏe hệ sinh thái đất. Vi sinh vật đất là thành phần quan trọng giúp thực vật chống lại côn trùng gây hại trên mặt đất. Việc cấy dịch huyền phù đất vào giá thể khử trùng làm tăng đáng kể khả năng kháng sâu trùng sâu *Trichoplusia* ở lá cây *Arabidopsis*, kết luận này xác nhận đóng góp của vi sinh vật đất đối với khả năng kháng côn trùng của thực vật (Badri et al., 2013). Có thể thấy vi sinh vật đất có thể đối kháng, ức chế hoặc trực tiếp tiêu diệt mầm bệnh. Thể thực khuẩn có thể tiêu diệt mầm bệnh hiệu quả, và động vật nguyên sinh có thể làm giảm mầm bệnh thông qua săn mồi (Irikiin et al., 2006; Mendes et al., 2018; Hu et al., 2015). Mạng lưới vi sinh vật đất phụ thuộc lẫn nhau trong các mối quan hệ tương hỗ, hợp tác, hoại sinh và ký sinh, tác động trực tiếp hoặc gián tiếp đến sức khỏe đất và thực vật.

Số lượng nội khuẩn của thực vật có nguồn gốc từ đất ảnh hưởng trực tiếp đến việc ăn lá của côn trùng. Sự trú ngụ của vi khuẩn *Beauveria bassiana* và *Metarhizium anisopliae* trong cây có thể thúc đẩy sự phát triển và khả năng kháng côn trùng của thực vật (Jaber et al., 2016). Sự định cư của nấm nội sinh như *Trichoderma* có thể giúp thực vật chống lại bọ trĩ *Thrips tabaci* (Mueve et al., 2014). Ngoài ra, vi sinh vật vùng rễ có thể kích hoạt hệ thống tính kháng ở thực vật giúp cây phản ứng nhanh để ngăn chặn sự tấn công của mầm bệnh, đồng thời làm thay đổi thành phần dinh dưỡng và các hợp chất phòng vệ thứ cấp trong cây, từ đó ảnh hưởng đến hành vi và khả năng gây hại của côn trùng. Sự khác biệt trong thành phần quần thể nấm trong đất ảnh hưởng đến nồng độ axit amin trong dịch mạch rây, gián tiếp ảnh hưởng đến việc lấy thức ăn của rệp (Kos et al., 2015). Canh tác hữu cơ giúp thay đổi quần thể vi sinh vật đất dẫn đến tăng cường tích lũy axit salicylic ở thực vật, từ đó làm giảm số lượng bọ cánh cứng trên cà chua trong khoảng 36-50 % (Blundell et al., 2020). Do đó, thành phần và sự đa dạng của vi sinh vật đất hoặc vi sinh vật vùng rễ và sự tương tác của chúng với thực vật có vai trò quan trọng trong sự phát triển khỏe mạnh của thực vật và giảm tính miễn cảm với sâu bệnh.

2.5. Vi sinh vật cải thiện môi trường đất thông qua xử lý chất ô nhiễm

2.5.1. Vi sinh vật phân hủy vi nhựa trong đất

Ô nhiễm vi nhựa (microplastic, < 5mm) trong đất trồng chủ yếu do con người gây ra, nguyên nhân có thể là do tưới nước thải, sử dụng bùn thải, phủ màng phủ nông nghiệp và bón phân hữu cơ (Sun et al., 2022). Sau khi xâm nhập và tích tụ trong đất, vi nhựa làm thay đổi thành phần quần thể vi sinh vật, chức năng trao đổi chất, từ đó ảnh hưởng trực tiếp hoặc gián tiếp đến chức năng hệ sinh thái đất và chu trình vật chất trong đất. Quá trình phân hủy sinh học vi nhựa có thể dẫn đến phát thải CO₂ do quá trình khoáng hóa carbon trong polymer nhựa, đồng thời gián tiếp ảnh hưởng đến chu trình carbon thông qua việc thay đổi cấu trúc và hoạt động của cộng đồng vi sinh vật đất (Huang et al., 2019). Thành phần của vi nhựa bao gồm C, H và O, khi tồn dư trong đất có thể kích hoạt vi sinh vật thay đổi chu trình dinh dưỡng (như N, P) của cây trồng, ảnh hưởng đến chu trình dinh dưỡng trong đất (Sander et al., 2019). Ngoài ra, các sản phẩm chuyển hóa từ quá trình phân hủy vi nhựa có thể gây ra những thay đổi trong môi trường đất. Chất nhựa Polyβ-hydroxybutyrate-co-β-hydroxy valerate, PHBV khi phân hủy giải phóng một lượng lớn axit 3-hydroxybutyric, dẫn đến hiện tượng chua hoá đất và có thể gây ảnh hưởng bất lợi đến sinh trưởng thực vật trong một số điều kiện nhất định (Yang et al., 2021). Các mảnh vụn hoặc tàn dư vi nhựa trong đất có thể phá vỡ kết cấu đất và tính liên tục của các kẽ hở trong đất ảnh hưởng đến khả năng giữ nước của đất, từ đó làm thay đổi chế độ nước trong đất, ảnh hưởng đến độ thông khí của đất, ảnh hưởng đến sự thay đổi quần thể vi sinh vật hảo khí hay yếm khí (Rillig et al., 2020; Wan et al., 2019; Rubol et al., 2013). Mặt khác, tính kỵ nước của vi nhựa khiến chúng trở thành vật mang các chất ô nhiễm ở dạng hữu cơ khó phân hủy trong đất, hấp phụ kim loại nặng và kháng sinh, nơi lưu trữ của của gen kháng kháng sinh và các vi khuẩn gây bệnh tiềm ẩn, dẫn đến tình trạng ô nhiễm phức tạp nghiêm trọng (Zhu et al., 2022).

Vi sinh vật phân hủy vi nhựa trong đất góp phần khôi phục sức khỏe của đất. Các enzyme ngoại bào và gốc tự do do vi sinh vật tiết ra có thể cắt các hợp chất polymer có phân tử lượng cao thành các phân tử có phân tử lượng thấp, sau đó được đồng hóa và khoáng hóa trong tế bào vi sinh vật thành các chất khí như H₂O, CO₂, N₂..., thông qua quá trình này đạt được mục đích phân hủy vi nhựa an toàn (Muhonja et al., 2018; Park et al., 2019). Thông thường, mức độ dễ phân hủy của vi nhựa quyết định hiệu suất phân hủy sinh học, với hiệu suất

phân hủy của nhóm polyolefin thấp hơn đáng kể so với nhóm polyester. Một số nhóm nấm trong điều kiện cụ thể có thể phân hủy gần như hoàn toàn các vi nhựa polyester (như poly-ε-caprolactone, polylactic acid, poly-3-hydroxybutyrate), tuy nhiên đối với các polyolefin như polyethylene (PE) hiệu quả phân hủy còn thấp (Zhang et al., 2021). Đối với sự phân hủy vi nhựa loại polyester, vi sinh vật chủ yếu thông qua enzyme thủy phân tác dụng lên các nhóm chức chứa oxy (Teuten et al., 2009). Mặt khác, trong phân hủy vi nhựa loại olefin, liên kết C - C bị phá vỡ thông qua tác dụng oxy hóa, đưa các nhóm chức vào trong khung liên kết carbon, tăng cường sự bám dính bề mặt của vi sinh vật lên vi nhựa, sau đó phân hủy vi nhựa đã bị oxy hóa (Wei et al., 2017). *Aspergillus caespitosus*, *Phialophora alba*, *Paecilomyces variotii*, *Aspergillus terreus*, *Alternaria alternata* và *Eupenicillium hirayamae* sản xuất các enzyme như Laccase, mangan peroxidase (MnP) và Lignin peroxidase (LiP) để phân hủy nhanh màng polyethylene mật độ thấp (Low density polyethylene, LDPE) (You et al., 2022). Ngoài ra, bổ sung nguồn carbon dễ sử dụng cho nấm trong đất để tăng hoạt tính của nấm, hoặc cây bổ sung nấm đều có thể đẩy nhanh đáng kể tốc độ phân hủy nhựa polyurethane (Cosgrove et al., 2010). Do tính kỵ nước của nhựa, sợi nấm trong đất bám dính vào bề mặt vi nhựa thông qua việc tiết chất kỵ nước (Sanchez, 2020), đồng thời khả năng xuyên thủng của sợi nấm thúc đẩy quá trình trú ngụ ban đầu trên bề mặt vi nhựa. Sự định cư của vi khuẩn phụ thuộc vào tính kỵ nước của bề mặt tế bào, và hầu hết vi khuẩn cần một điểm tiếp xúc với bề mặt vi nhựa để định cư thông qua phân chia tế bào (Tribedi et al., 2014). Các nhóm nấm *Ascomycota* (nấm túi), *Basidiomycota* (nấm đảm) và *Mucoromycota* (nấm tiếp hợp) đóng vai trò quan trọng trong quá trình phân hủy vi nhựa, trong khi các nhóm vi khuẩn chính tham gia vào quá trình này bao gồm *Proteobacteria* (vi khuẩn biến hình), *Firmicutes* (vi khuẩn cứng), *Actinobacteria* (vi khuẩn tia) và *Bacteroidetes* (vi khuẩn dạng que) (You et al., 2022). Với những dẫn chứng này, việc ứng dụng các vi sinh vật và enzyme có tiềm năng phân hủy để xử lý đất ô nhiễm vi nhựa có ý nghĩa quan trọng trong việc duy trì sức khỏe đất.

2.5.2. Vai trò của vi sinh vật trong cố định và giảm độc tính kim loại nặng trong đất

Kim loại nặng khi xâm nhập vào môi trường đất, rất khó loại bỏ chúng khỏi đất bằng phương pháp hóa học hoặc phản ứng phân hủy sinh học. Khi sự tích lũy kim loại nặng trong đất vượt quá ngưỡng quy định về chất lượng đất, chúng sẽ đe dọa sức khỏe con người và động vật. Do đó, việc xử lý kim

loại nặng trong đất có ý nghĩa cực kỳ quan trọng đối với sức khỏe đất và các sinh vật sống.

Các phương pháp xử lý truyền thống bao gồm xử lý vật lý, hóa học, nhưng có thể gây ô nhiễm thứ cấp và ảnh hưởng tiêu cực đến đặc tính của đất. Ngược lại, một số vi sinh vật trong đất có khả năng thích nghi cực mạnh với môi trường ô nhiễm kim loại nặng và có khả năng làm giảm ion kim loại nặng từ đó làm giảm hoạt tính sinh học của kim loại nặng trong đất.

Sự tương tác giữa vi sinh vật và kim loại bao gồm hấp phụ sinh học, cố định sinh học, phản ứng oxy hóa-khử của vi sinh vật đối với ion kim loại, tạo phức giữa EPSs (Exopolysaccharides) do vi sinh vật tiết ra và ion kim loại nặng.

Vi sinh vật trong đất có thể tạo liên kết hóa học với ion kim loại nặng thông qua tạo liên kết phức chất từ đó hấp phụ kim loại nặng, từ đó làm giảm số lượng ion kim loại nặng trong đất, hạn chế sinh vật sử dụng, giảm độc tính sinh học của kim loại nặng (Mosa et al., 2016). Các loài như *Pseudomonas* (trực khuẩn mũ xanh), *Enterobacter* (trực khuẩn đường ruột), *Bacillus* (trực khuẩn hình que) và *Micrococcus cohnii* (cầu khuẩn) có khả năng hấp thu kim loại nặng tốt (Ayangbenro et al., 2017).

Vi sinh vật có thể thông qua nhiều cơ chế, kết hợp với ion kim loại nặng. Một số nhóm chức hóa học trên bề mặt thành tế bào có thể trực tiếp tạo phức với ion kim loại nặng, hoặc bao bọc chúng trong thành tế bào (Liu et al., 2008) hoặc làm kết tủa trên bề mặt tế bào (Bai et al., 2014; Nguyễn Thị Hiền Trang và cs., 2024).

Tác dụng làm giảm hoạt tính sinh học của kim loại nặng bằng vi sinh vật phụ thuộc vào quá trình trao đổi chất của vi sinh vật. Các cơ chế này giúp đưa ion kim loại nặng trong đất vào bên trong tế bào vi sinh vật, làm giảm ảnh hưởng của kim loại nặng trong đất. Từ đất nông nghiệp ô nhiễm cadmium, đã phân lập được một chủng vi khuẩn kháng cadmium *Pseudomonas B7*, chủng vi khuẩn này có khả năng liên kết và tích lũy cadmium hiệu quả, góp phần làm giảm đáng kể nồng độ cadmium hòa tan trong môi trường nghiên cứu (Wu et al., 2022).

EPS (Exopolysaccharides) được tiết ra bởi vi sinh vật có thể tạo phức với thủy ngân, chì và asen, hình thành các phức chất bền vững giúp làm giảm tính khả dụng sinh học của kim loại nặng đối với cây trồng và sinh vật đất (Song et al., 2020). Ngoài ra, vi sinh vật tham gia vào phản ứng oxy hóa-khử, thay đổi trạng thái oxy hóa của kim loại nặng, từ đó ảnh hưởng đến khả năng di chuyển

hoặc độc tính của chúng. Trong đất, phần lớn Cr^{3+} tồn tại ở dạng kết tủa, trong khi Cr^{6+} tương đối ổn định và có độc tính cao hơn. Các vi sinh vật như *Corynebacterium* có thể khử Cr^{6+} thành Cr^{3+} ít hòa tan hơn, đồng thời keo đất hấp phụ mạnh Cr^{3+} làm cho ion này khó di chuyển (Goyal et al., 2003). Vi sinh vật đóng vai trò trung gian trong quá trình giải độc asen trong đất trồng lúa, trong đất lúa ngập nước, As(V) trong đất có thể bị khử thành As(III), làm tăng tính di động của asen trong đất trồng lúa, từ đó gây hại nhiều hơn cho cây trồng. Từ đất lúa, đã phân lập được một chủng vi khuẩn thuộc chi *Acidovorax ST3*. Chủng này trong điều kiện kỵ khí có thể sử dụng nitrat làm chất nhận electron để oxy hóa As(III) thành As(V) trong điều kiện không có oxy, làm giảm nồng độ asen tổng số trong đất lúa, giảm thiểu gây hại trên đất trồng lúa (Zhang et al., 2022). Ngoài ra, vi sinh vật còn có thể thay đổi tính chất vật lý, hóa học và sinh học của đất để giảm hoạt tính của kim loại nặng. Ví dụ, các chủng vi khuẩn sản xuất poly- γ -glutamic acid (γ -PGA) làm tăng lượng γ -PGA, pH và tăng cường các loài như *Sphingomonas* và *Bacillus* trong dịch lọc đất ô nhiễm cadmium, từ đó bất động hóa cadmium và giảm tính di động của cadmium trong đất (Wang et al., 2020).

Các bằng chứng trên cho thấy vi sinh vật đất đóng vai trò then chốt trong việc điều tiết và giảm thiểu độc tính của kim loại nặng thông qua nhiều cơ chế sinh học khác nhau, bao gồm hấp phụ, cố định, tạo phức với EPS, phản ứng oxy hóa-khử và bất động hóa trong cấu trúc đất. Những cơ chế này không chỉ làm giảm tính khả dụng sinh học và độc tính của kim loại nặng mà còn góp phần duy trì sức khỏe đất và hệ sinh thái. Việc khai thác tiềm năng của các loài vi sinh vật có khả năng kháng và chuyển hóa kim loại nặng mở ra hướng tiếp cận bền vững, an toàn hơn so với các phương pháp xử lý truyền thống, đồng thời tạo nền tảng cho các chiến lược quản lý đất nông nghiệp và môi trường theo hướng sinh học, thân thiện với hệ sinh thái.

2.5.3. Vi sinh vật phân hủy dư lượng thuốc bảo vệ thực vật trong đất

Thuốc bảo vệ thực vật có tác dụng lớn trong việc tăng năng suất cây trồng và quản lý nông nghiệp, nhưng cần hiểu biết rõ về những rủi ro về mặt môi trường và tác động tiềm ẩn lên các sinh vật có ích.

Là động lực chính của quá trình phân hủy và loại bỏ thuốc bảo vệ thực vật, vi sinh vật chủ yếu phân hủy dư lượng thuốc bảo vệ thực vật trong đất thông qua hai cơ chế: phản ứng enzym và phản ứng không enzym. Phản ứng enzym là quá trình vi sinh vật thông qua các enzyme ngoại bào hoặc

nội bào tiết ra để tác động trực tiếp lên thuốc bảo vệ thực vật, phân hủy hoàn toàn hoặc chuyển hóa thành các hợp chất có phân tử lượng nhỏ hơn, ít độc hoặc không độc. Bên cạnh quá trình phân hủy trực tiếp bởi enzyme vi sinh vật, dư lượng thuốc bảo vệ thực vật còn có thể bị chuyển hóa thông qua các phản ứng phi sinh học như thủy phân, oxy hóa – khử và các biến đổi hóa học chịu ảnh hưởng của pH, độ ẩm, nhiệt độ và thành phần khoáng của đất. Hoạt động của vi sinh vật có thể gián tiếp thúc đẩy các quá trình này thông qua việc làm thay đổi điều kiện môi trường đất. Trong đó, phản ứng enzym là hình thức chính của quá trình phân hủy thuốc bảo vệ thực vật bằng vi sinh vật. Ngoài ra, 5 nhóm oxygenase liên quan đến phân hủy thuốc bảo vệ thực vật do vi sinh vật tiết ra bao gồm Flavine-dependent monooxygenase, Cytochrome P450 monooxygenase, Rieske non-heme iron oxygenase, Fe(II)/ α -ketoglutarate-dependent dioxygenase, Ring-cleavage dioxygenase và các nhóm enzyme khác liên quan đến phân hủy thuốc bảo vệ thực vật organophosphorus hydrolase – OPH, esterase, amidase, dehalogenase, laccase, glyphosate oxidoreductase sử dụng phân tử oxy (O_2) làm chất nhận electron cuối cùng, các enzyme này tham gia xúc tác quá trình oxy hóa, thủy phân hoặc cắt mạch các hợp chất thuốc bảo vệ thực vật, qua đó làm giảm độc tính và thúc đẩy quá trình phân hủy sinh học của chúng trong môi trường đất (Cheng et al., 2022; Lê Thị Trinh, 2013). Bên cạnh đó, hiện tượng đồng chuyển hóa (co-metabolism) Trong một quần thể vi sinh vật (consortium) là chìa khóa quan trọng để phân hủy tồn dư thuốc bảo vệ thực vật. Một loài trong quần thể có thể thực hiện đồng chuyển hóa một chất độc hại hoặc khó phân hủy, tạo ra các sản phẩm trung gian. Các sản phẩm trung gian này lại trở thành chất nền cho các loài khác trong quần thể vi sinh vật tiếp tục phân hủy cho đến khi tồn dư thuốc bảo vệ thực vật trong đất được phân hủy hoàn toàn. Xây dựng mạng lưới hỗ trợ giữa các vi sinh vật đa dạng để lợi dụng các phản ứng enzym khác nhau thông qua sự hợp tác phân công và đồng chuyển hóa sẽ có lợi trong việc phân hủy hoàn toàn các hợp chất độc hại, nâng cao hiệu quả phân hủy thuốc bảo vệ thực vật. Do đó, sự kết hợp của nhiều chủng vi sinh vật có tiềm năng thúc đẩy quá trình phân hủy sinh học thuốc bảo vệ thực vật, đặc biệt là đối với các loại thuốc có cấu trúc bền vững hoặc độc tính mạnh.

2.5.4. Vai trò của vi sinh vật trong kiểm soát sự lan truyền gen kháng kháng sinh trong đất

Việc lạm dụng kháng sinh đã gây ô nhiễm nghiêm trọng trong đất, đe dọa sức khỏe hệ sinh thái và con người. Các nguồn ô nhiễm chính bao

gồm phân bón, phân gà, phân lợn với các nhóm kháng sinh phổ biến là sulfonamide, tetracycline và fluoroquinolone (Wu et al., 2023).

Kháng sinh tích tụ trong đất sẽ tiêu diệt có chọn lọc một số nhóm vi sinh vật, một số nhóm vi sinh vật khác được hưởng lợi từ nguồn tài nguyên dư thừa, dẫn đến mất cân bằng hệ vi sinh vật bản địa và suy thoái chức năng sinh thái đất. Đồng thời, áp lực chọn lọc trong môi trường đất có dư lượng kháng sinh lớn thúc đẩy quá trình tiến hóa gen kháng kháng sinh (ARGs) ở các vi sinh vật. Gen kháng sinh ARGs có khả năng tồn lưu, di chuyển và phát tán qua các môi trường khác nhau. Các phân tử di truyền di động (MGEs) như plasmid và transposon, integron đóng vai trò là “phương tiện vận chuyển” chính cho các gen kháng kháng sinh, thúc đẩy sự lan truyền nhanh chóng của kháng kháng sinh giữa các vi khuẩn. Sự nhân lên của ARGs chịu sự chi phối của quá trình chuyển gen ngang (Horizontal gene transfer, HGT) và cấu trúc quần thể vi sinh vật. Sự suy giảm đa dạng của quần thể vi sinh vật đất làm gia tăng sự lan truyền ARGs (Chen et al., 2019).

Kháng sinh từ hoạt động nông nghiệp được xác định là tác nhân chính làm gia tăng ARGs toàn cầu. Các biện pháp kiểm soát hiệu quả bao gồm: giảm sử dụng kháng sinh trong thức ăn chăn nuôi; xử lý phân chuồng (manure) bằng cách tạo thành than sinh học (biochar) để phân hủy kháng sinh. Những phương pháp này giúp giảm hàm lượng ARGs và hạn chế chuyển gen ngang (Zhou et al., 2019; Lin et al., 2020).

Ngoài ra, nghiên cứu tập trung vào việc sàng lọc các chủng vi sinh vật phân hủy hiệu quả như *Achromobacter xylosoxidans* và *Bacillus subtilis* (có khả năng phân hủy tetracycline, oxytetracycline) hay phối hợp *P. chrysosporium* và *P. sanguineus* để phân hủy các chất kháng sinh ciprofloxacin, norfloxacin và sulfamethoxazole nhờ hệ thống enzyme oxy hóa (Gao et al., 2018). Tuy nhiên, tính phức tạp và cạnh tranh cao của hệ vi sinh vật đất làm hạn chế khả năng tồn tại của các chủng vi sinh vật được nghiên cứu sau khi được cấy vào đất.

2.6. Ứng dụng dữ liệu hệ vi sinh vật đất trong đánh giá và dự đoán sức khỏe đất

Hệ thống đánh giá tổng hợp sức khỏe đất đòi hỏi phải giám sát đồng thời nhiều chỉ tiêu của đất, dẫn đến chi phí phân tích cao và khó áp dụng trong sản xuất thực tế. Vi sinh vật đất là yếu tố nhạy cảm của môi trường đất, cung cấp nguồn thông tin phong phú về đặc tính đất. Quần thể vi sinh vật đất phản ứng trực tiếp hoặc gián tiếp với các thay đổi môi trường như pH, độ mặn, bệnh hại qua đất và ô

nhiễm đất. Việc phân tích hệ vi sinh vật đất có thể đảm bảo tính hợp lý về chi phí và giúp đánh giá được sức khỏe đất.

Hiện nay, thông tin về hệ vi sinh vật có thể phản ánh về tình trạng sức khỏe môi trường. Ví dụ, quần thể vi khuẩn có thể chỉ mức độ xáo trộn lưu vực và tình trạng ô nhiễm uranium, nitrat trong nước ngầm (Lau et al., 2015). Vi sinh vật có tiềm năng trong dự đoán ô nhiễm và chức năng hệ sinh thái. Trong hệ sinh thái đất, một số nhóm vi sinh vật cụ thể có mối tương quan chặt chẽ với các chỉ số trong đất như hàm lượng carbon hữu cơ dễ thủy phân, hàm lượng dinh dưỡng, độ chặt và pH (Thomson et al., 2019; Hermans et al., 2020). Độ chính xác của việc dự đoán chỉ số chất lượng đất tổng hợp và chỉ số sức khỏe đất dựa trên quần thể vi sinh vật lần lượt đạt 50%~95% và 80%. Dựa trên quần thể vi sinh vật phân biệt các nhóm đất có đặc tính vật lý, hóa học tương tự nhau tùy thuộc vào chỉ tiêu cụ thể, trong đó chỉ tiêu pH có độ chính xác khá cao, từ đó có cơ sở để đánh giá sức khỏe đất (Hermans et al., 2020; Wilhelm et al., 2022). Trong khi đó, các nhóm vi khuẩn như KD4-96, Nitrososphaeraceae và Pyrinomonadaceae thường xuất hiện ở đất khỏe mạnh (Wilhelm et al., 2022). Hiểu biết về các nhóm vi khuẩn này có ý nghĩa quan trọng trong cảnh báo sớm, phục hồi và duy trì sức khỏe đất, tạo tiền đề để phát triển chế phẩm vi sinh, canh tác đất

bền vững (Toju et al., 2018).

3. KẾT LUẬN

Vi sinh vật đất có vai trò quan trọng trên các mặt ổn định kết cấu đất, tích lũy chất hữu cơ, tuần hoàn dinh dưỡng, điều tiết chủng loại các hợp chất khoáng có chứa nguyên tố dinh dưỡng và tăng trưởng thực vật. Vi sinh vật đất tham gia điều tiết phát thải khí nhà kính và phân hủy chất ô nhiễm, góp phần duy trì hệ sinh thái đồng ruộng. Quần thể vi sinh vật và chức năng đa dạng trong điều tiết hệ thống sinh thái đất có ảnh hưởng đến khả năng phục hồi của đất và sức đề kháng của đất, từ đó có vai trò quan trọng trong việc duy trì độ phì nhiêu của đất và sản xuất bền vững. Đối với sức khỏe đất, vi sinh vật đất có chức năng quan trọng đối với hệ sinh thái đất, môi trường đất và khả năng miễn dịch cảm ứng ở cây do vi sinh vật đất kích hoạt.

Các nghiên cứu trong tương lai cần hướng đến phân tích Metagenome và tin sinh học dưới các hệ thống canh tác khác nhau để xây dựng bộ tiêu chí chẩn đoán sức khỏe đất, làm cơ sở phát triển các chế phẩm sinh học bản địa đặc hiệu cho từng hệ thống canh tác của Việt Nam. Bên cạnh đó, cần cập nhật nghiên cứu xây dựng mô hình AI tích hợp dữ liệu metagenome, đặc tính lý-hóa đất, lịch sử canh tác và khí hậu để giảm thiểu hại do bệnh hại bằng cảnh báo sớm, đề xuất giải pháp cải tạo đất và quản lý dinh dưỡng chính xác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ayangbenro, A. S. and Babalola, O. O. (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(1): 94.
- Bai, J. et al. (2014). Biosorption mechanisms involved in immobilization of soil Pb by *Bacillus subtilis* DBM in a multi-metal-contaminated soil. *Journal of Environmental Sciences*, 26(10): 2056-2064.
- Bakken, L. R. and Frostegard, A. (2020). Emerging options mitigating N₂O emissions from food production by manipulating the soil microbiota. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 47: 89-94.
- Badri, D. V. et al. (2013). Potential impact of soil microbiomes on the leaf metabolome and on herbivore feeding behavior. *New Phytologist*, 198(1): 264-273.
- Bergkemper, F. et al. (2016). Phosphorus depletion in forest soils shapes bacterial communities towards phosphorus recycling systems. *Environmental Microbiology*, 18(6): 1988-2000.
- Bloch, S. E. et al. (2020). Biological nitrogen fixation in maize: Optimizing nitrogenase expression in a root-associated diazotroph. *Journal of Experimental Botany*, 71(15): 4591-4603.
- Blundell, R. et al. (2020). Organic management promotes natural pest control through altered plant resistance to insects. *Nature Plants*, 6(5): 483-491.
- Charyulu, P. B. B. N. and Rao, V. R. (1981). Influence of carbon substrates and moisture regime on nitrogen fixation in paddy soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 13(1): 39-42.

- Chen, H. et al. (2021). Soil microbial CO₂ fixation plays a significant role in terrestrial carbon sink in a dryland ecosystem: A four year small-scale field-plot observation on the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 761: 143282.
- Chen, Q. L. et al. (2019). Loss of soil microbial diversity exacerbates spread of antibiotic resistance. *Soil Ecology Letters*, 1(1): 3-13.
- Chen, Q. L. et al. (2019). Antibiotic resistomes in plant microbiomes. *Trends in Plant Science*, 24(6): 530-541.
- Cheng, M. G. et al. (2022). Oxygenases as powerful weapons in the microbial degradation of pesticides. *Annual Review of Microbiology*, 76: 325-348.
- Coban, O. et al. (2022). Soil microbiota as game-changers in restoration of degraded lands. *Science*, 375(6584): abe0725.
- Coskun, D. et al. (2017). Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. *Nature Plants*, 3(6): 17074.
- Cosgrove, L. et al. (2010). Effect of biostimulation and bioaugmentation on degradation of polyurethane buried in soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(3): 810-819.
- Trần Viết Cường và cs.. (2018). *Giáo trình vi sinh vật học môi trường*. Hà Nội: NXB Bách Khoa Hà Nội.
- Lê Đình Cường và cs.. (2022). Nghiên cứu đánh giá khả năng lưu giữ carbon trong đất nông nghiệp. *Thông tin khoa học và công nghệ hạt nhân*, 70: 37 -41.
- Dai, Z. M. et al. (2020). Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems. *The ISME Journal*, 14(3): 757-770.
- Deng, J. Z. et al. (2015). Synergistic effects of soil microstructure and bacterial EPS on drying rate in emulated soil micromodels. *Soil Biology & Biochemistry*, 83: 116-124.
- Doran, J. W. et al. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15(1): 3-11.
- Feng, X. H. et al. (2022). Nitrogen input enhances microbial carbon use efficiency by altering plant-microbe-mineral interactions. *Global Change Biology*, 28(16): 4845-4860.
- Gao, N. et al. (2018). Simultaneous removal of ciprofloxacin, norfloxacin, sulfamethoxazole by co-producing oxidative enzymes system of *Phanerochaete chrysosporium* and *Pycnoporus sanguineus*. *Chemosphere*, 195: 146-155.
- Goyal, N., Jain, S. C., Banerjee, U. C. (2003). Comparative studies on the microbial adsorption of heavy metals. *Advances in Environmental Research*, 7(2): 311-319.
- Herridge, D. F., Peoples, M. B., and Boddey, R. M. (2008). Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*, 311(1): 1-18.
- Hermans, S. M. et al. (2020). Using soil bacterial communities to predict physico-chemical variables and soil quality. *Microbiome*, 8(1): 1-13.
- Hink, L. et al. (2017). Kinetics of NH₃-oxidation, NO₂-turnover, N₂O-production and electron flow during oxygen depletion in model bacterial and archaeal ammonia oxidisers. *Environmental Microbiology*, 19(12): 4882-4896.
- Hu, J. et al. (2016). Probiotic diversity enhances rhizosphere microbiome function and plant disease suppression. *mBio*, 7(6): e01790-16.
- Huang, Q. et al. (2022). Metabolic pathways of CO₂ fixing microorganisms determined C-fixation rates in grassland soils along the precipitation gradient. *Soil Biology & Biochemistry*, 172: 108764.
- Huang, Y. et al. (2019). LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil. *Environmental Pollution*, 254: 112983.
- Huang, Y. L. et al. (2021). Labile carbon facilitated phosphorus solubilization as regulated by bacterial and fungal communities in *Zea mays*. *Soil Biology & Biochemistry*, 163: 108465.
- Irikitin, Y. et al. (2006). Rhizobacterial community-level, sole carbon source utilization pattern affects the delay in the bacterial wilt of tomato grown in rhizobacterial community model system. *Applied Soil Ecology*, 34(1): 27-32.

- Jaber, L. R., Enkerli, J. (2016). Effect of seed treatment duration on growth and colonization of *Vicia faba* by endophytic *Beauveria bassiana* and *Metarhizium brunneum*. *Biological Control*, 103: 187-195.
- Jian, S. Y. et al. (2016). Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: A meta-analysis. *Soil Biochemistry*, 101: 32-43.
- Karlen, D. L., Andrews, S. S., Doran, J. W. (2001). Soil quality: Current concepts and applications. *Advances in Agronomy*, 74(01):1-40
- Kallenbach, C. M., Frey, S. D., and Grandy, A. S. (2016). Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. *Nature Communications*, 7(1): 13630.
- Kuypers, M. M. M., Marchant, H. K., and Kartal, B. (2018). The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, 16(5): 263-276.
- Kos, M., Tuijl, M. A. B., Roo, J. et al. (2015). Species-specific plant-soil feedback effects on above-ground plant-insect interactions. *Journal of Ecology*, 103(4): 898-904.
- Lau, K. E. M. et al. (2015). A novel bacterial community index to assess stream ecological health. *Freshwater Biology*, 60(10): 1988-2002.
- Lehmann, A., Zheng, W. S., and Rillig, M. C. (2017). Soil biota contributions to soil aggregation. *Nature Ecology & Evolution*, 1(12): 1828-1835.
- Li, X. Z., Luo, Y. M., Hou, D. Y. (2022). The Indicators, framework and procedures for soil health: a critical review. *Acta Pedologica Sinica*, 59(3): 617-625.
- Lin, Y. X. et al. (2018). Long-term application of lime or pig manure rather than plant residues suppressed diazotroph abundance and diversity and altered community structure in an acidic Ultisol. *Soil Biology & Biochemistry*, 123: 218-228.
- Lin. H. et al. (2020). Acidic conditions enhance the removal of sulfonamide antibiotics and antibiotic resistance determinants in swine manure. *Environmental Pollution*, 263: 114439.
- Liang, C., Zhu, X. F. (2021). The soil microbial carbon pump as a new concept for terrestrial carbon sequestration. *Scientia Sinica: Terrae*, 51(5): 680-695.
- Liang, C. et al. (2019). Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter. *Global Change Biology*, 25(11): 3578-3590.
- Liu, Y. G. et al. (2008). Study on the biosorption of heavy metals by fungi[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 35(1): 71-74.
- Liu, Y. L., Wang, P., Wang, J. K. (2023). Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect. *Acta Pedologica Sinica*, 60(3): 627-643.
- Lu, J. L., Jia, P., Feng, S. W., et al. (2022). Remarkable effects of microbial factors on soil phosphorus bioavailability: A country-scale study. *Global Change Biology*, 28(14): 4459-4471.
- Mendes, L. W. et al. (2018). Breeding for soil-borne pathogen resistance impacts active rhizosphere microbiome of common bean. *The ISME Journal*, 12(12): 3038-3042.
- Merino-Martin, L. et al. (2021). Interacting effects of land use type, soil microbes and plant traits on aggregate stability. *Soil Biology & Biochemistry*, 154: 108072.
- Phạm Thị Miên, Phan Minh Thu (2021). Vi sinh vật chuyển hóa lân khó tan trong đất và tiềm năng áp dụng trong nông nghiệp. *Tạp chí Khoa học Nông nghiệp Việt Nam*, 19(8): 1028-1038.
- Montanarella, L. et al. (2015). *The Status of the World's Soil Resources (Main Report)*. Rome: Food and agriculture organization of the united nations
- Mosa, K. A. et al. (2016). Potential biotechnological strategies for the cleanup of heavy metals and metalloids. *Frontiers in Plant Science*, 7: 303.
- Muhonja, C. N. et al. (2018). Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PLoS One*, 13(7): e0198446.
- Muvea, A. M. et al. (2014). Colonization of onions by endophytic fungi and their impacts on the biology of *Thrips tabaci*. *PLoS One*, 9(9): e108242.
- Nazir, M. J. et al. (2024). Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in

- agriculture. *Soil & Tillage Research*, 2024:237
- Oliverio, A. M. et al. (2020). The role of phosphorus limitation in shaping soil bacterial communities and their metabolic capabilities. *mBio*, 11(5): e01718-20.
- Olagoke, F. K. et al. (2022). Importance of substrate quality and clay content on microbial extracellular polymeric substances production and aggregate stability in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 58(4): 435-457.
- Park, Y. et al. (2022). Strategies of organic phosphorus recycling by soil bacteria: Acquisition, metabolism, and regulation. *Environmental Microbiology Reports*, 14: 3-24.
- Park, S. Y., Kim, C. G. (2019). Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere*, 222: 527-533.
- Nguyễn Ngọc Quỳnh và cs.. (2019). Nghiên cứu vi sinh vật chuyển hoá hydrocarbon. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam*, 9(106): 88 - 91.
- Rashid, M. I. et al. (2016). Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. *Microbiological Research*, 183: 26-41.
- Rillig, M. C. (2004). Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science*, 84(4): 355-363.
- Rillig, M. C., Lehmann, A. (2020). Microplastic in terrestrial ecosystems. *Science*, 368(6498): 1430-1431.
- Rodriguez, H. et al. (2006). Genetics of phosphate solubilization and its potential applications for improving plant growth-promoting bacteria. *Plant and Soil*, 287(1): 15-21.
- Rubol, S. et al. (2013). Modeling soil moisture and oxygen effects on soil biogeochemical cycles including dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA). *Advances in Water Resources*, 62: 106-124.
- Sander, M. (2019). Biodegradation of polymeric mulch films in agricultural soils: Concepts, knowledge gaps, and future research directions. *Environmental Science & Technology*, 53(5): 2304-2315.
- Sanchez, C. (2020). Fungal potential for the degradation of petroleum-based polymers: An overview of macro - biodegradation. *Biotechnology Advances*, 40: 107501.
- Sharma, S. B. et al. (2013). Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2(1): 587.
- Song, H. et al. (2020). Structure and activity of PPX/GppA homologs from *Escherichia coli* and *Helicobacter pylori*. *The FEBS Journal*, 287(9): 1865-1885.
- Song, W. J. et al. (2020). Influence of metals and metalloids on the composition and fluorescence quenching of the extracellular polymeric substances produced by the polymorphic fungus *Aureobasidium pullulans*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(16): 7155-7164.
- Sun, Y. Z. et al. (2022). Biodegradable and conventional microplastics exhibit distinct microbiome, functionality, and metabolome changes in soil. *Journal of Hazardous Materials*, 424: 127282.
- Tao, C. Y. et al. (2020). Bio-organic fertilizers stimulate indigenous soil *Pseudomonas* populations to enhance plant disease suppression. *Microbiome*, 8(1): 137.
- Teuten, E. L. et al. (2009). Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 364 (1526): 2027-2045.
- Thauer, R. K. (2007). Microbiology. A fifth pathway of carbon fixation. *Science*, 318(5857): 1732-1733.
- Thompson, J., Johansen, R., Dunbar, J. et al. (2019). Machine learning to predict microbial community functions: An analysis of organic carbon from litter decomposition. *PLoS One*, 14(7): e0215502.
- Toju, H. et al. (2018). Core microbiomes for sustainable agroecosystems. *Nature Plants*, 4(5): 247-257.
- Nguyễn Thị Hiền Trang và cs.. (2024). Cố định kim loại nặng bằng phương pháp vi sinh vật tạo kết tủa carbonate bởi *priestia megaterium* ND22. *Hội nghị khoa học toàn quốc về công nghệ sinh học*. 598 -603
- Tribedi, P., Sil, A. K. (2014). Cell surface hydrophobicity: A key component in the degradation of polyethylene succinate by *Pseudomonas* sp. AKS2. *Journal of Applied Microbiology*, 116(2): 295-303.

- Lê Thị Trinh (2013). Bước đầu nghiên cứu chủng vi sinh vật trong đất cát pha nhiều mùn có khả năng tham gia quá trình phân hủy thuốc trừ sâu cơ photpho chứa hoạt chất Diazinon. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Việt Nam*, 15: 47-50.
- Wang, B. R. et al. (2021). Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems. *Soil Biology & Biochemistry*, 162: 108422.
- Wang, C. et al. (2021). The temperature sensitivity of soil: Microbial biodiversity, growth, and carbon mineralization. *The ISME Journal*, 15(9): 2738-2747.
- Wang, C. et al. (2021). Large-scale importance of microbial carbon use efficiency and necromass to soil organic carbon. *Global Change Biology*, 27(10): 2039-2048.
- Wang, W. Y. et al. (2021). Continuous application of conservation tillage affects *in situ* N₂O emissions and nitrogen cycling gene abundances following nitrogen fertilization. *Soil Biology & Biochemistry*, 157: 108239.
- Wang, X. H. et al. (2020). Poly-γ-glutamic acid-producing bacteria reduced Cd uptake and effected the rhizosphere microbial communities of lettuce. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 398: 123146.
- Wan, Y. et al. (2020). Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of the Total Environment*, 654: 576-582.
- Wei, R., and Zimmermann, W. (2017). Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: How far are we?. *Microbial Biotechnology*, 10(6): 1308-1322.
- Wei, X. M. et al. (2019). Rare taxa of alkaline phosphomonoesterase-harboring microorganisms mediate soil phosphorus mineralization. *Soil Biology & Biochemistry*, 131: 62-70.
- Wei, Z. et al. (2015). Trophic network architecture of root-associated bacterial communities determines pathogen invasion and plant health. *Nature Communications*, 6(1): 8413.
- Wilhelm, R. C., Vanes, H. M., Buckley, D. H. (2022). Predicting measures of soil health using the microbiome and supervised machine learning. *Soil Biology & Biochemistry*, 164: 108472.
- Wilpiseski, R. L. et al. (2019). Soil aggregate microbial communities: Towards understanding microbiome interactions at biologically relevant scales. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(14): e00324-19.
- Wu, J. et al. (2023). Antibiotics and antibiotic resistance genes in agricultural soils: A systematic analysis. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(7): 847-864.
- Wu, J. J., Cheng, X. L., Liu, G. H. (2022). Increased soil organic carbon response to fertilization is associated with increasing microbial carbon use efficiency: Data synthesis. *Soil Biology & Biochemistry*, 171: 108731.
- Wu, S. J. et al. (2022). Cd immobilization mechanisms in a *Pseudomonas* strain and its application in soil Cd remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 425: 127919.
- Wu, W. C. et al. (2022). *In situ* diversity of metabolism and carbon use efficiency among soil bacteria. *Science Advances*, 8(44): eabq3958.
- Xiao, K. Q. et al. (2021). Metagenomic and ¹⁴C tracing evidence for autotrophic microbial CO₂ fixation in paddy soils. *Environmental Microbiology*, 2021, 23(2): 924-933.
- Yang, W. W. et al. (2021). Effects of microplastics on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in a soil spiked with ZnO nanoparticles. *Soil Biology & Biochemistry*, 2021, 155: 108179.
- Yao, Q. M. et al. (2018). Community proteogenomics reveals the systemic impact of phosphorus availability on microbial functions in tropical soil. *Nature Ecology & Evolution*, 2(3): 499-509.
- You, L. C. et al. (2022). Global meta-analysis of terrestrial nitrous oxide emissions and associated functional genes under nitrogen addition. *Soil Biology & Biochemistry*, 165: 108523.
- You, X. X. et al. (2022). Microplastics in the soil: A review of distribution, anthropogenic impact, and interaction with soil microorganisms based on meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2022, 832: 154975.
- Yuan, J. et al. (2020). Predicting disease occurrence with high accuracy based on soil macroecological patterns of *Fusarium* wilt. *The ISME Journal*, 14(12): 2936-2950.

- Zhang, J. L. et al. (2020). Soil health and agriculture green development: Opportunities and challenges. *Acta Pedologica Sinica*, 57(4): 783-796.
- Zhang, J. Z. et al. (2022). Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health. *Acta Pedologica Sinica*, 59(3): 603-616.
- Zhang, J. et al. (2022). Oxidation of organoarsenicals and antimonite by a novel flavin monooxygenase widely present in soil bacteria. *Environmental Microbiology*, 24(2): 752-761.
- Zhang, N. et al. (2021). Theory of microbial coexistence in promoting soil-plant ecosystem health. *Biology and Fertility of Soils*, 57(7): 897-911.
- Zhang, X. Y. et al. (2021). Systematical review of interactions between microplastics and microorganisms in the soil environment. *Journal of Hazardous Materials*, 418: 126288.
- Zhao, X. C. et al. (2023). Mean annual temperature and carbon availability respectively controlled the contributions of bacterial and fungal residues to organic carbon accumulation in topsoil across China's forests. *Global Ecology and Biogeography*, 32(1): 120-131.
- Zhou, X. et al. (2019). Turning pig manure into biochar can effectively mitigate antibiotic resistance genes as organic fertilizer. *Science of the Total Environment*, 649: 902-908.
- Zhu, D. et al. (2022). Soil plastispheres as hotspots of antibiotic resistance genes and potential pathogens. *The ISME Journal*, 16(2): 521-532.
- Zhu, X. F. et al. (2020). The soil microbial carbon pump: From conceptual insights to empirical assessments. *Global Change Biology*, 26(11): 6032-6039
- Zhu, Y. G. et al. (2021). Linking the soil microbiome to soil health. *Scientia Sinica: Vitae*, 51(1): 1-11.

THE ROLE OF MICROORGANISMS IN SOIL HEALTH: AN OVERVIEW

Tran Thi Bien Thuy¹, Nguyen Van Minh¹

Received Date: 24/09/2025; Revised Date: 17/06/2026; Accepted for Publication: 18/06/2026

ABSTRACT

Soil health refers to the capacity of soil to sustain essential ecosystem functions. Biological factors are key drivers of these functions. Soil microbial communities play a central role in regulating material and energy flows, while directly participating in critical biological processes. Through the activities of beneficial soil microorganisms, ecological functions, environmental quality, and soil resilience are maintained. This article highlights the pivotal role of beneficial microorganisms in sustaining soil health, based on an analysis of major biological processes such as the carbon cycle, nutrient cycling and transformation, soil structure stabilization, pest and disease suppression, and soil pollution control. These insights contribute to clarifying both the theoretical and practical foundations of microbial functions in soil health management.

Keywords: functions, soil health, beneficial microorganism.

¹Faculty of Agriculture, Tay Nguyen University;

Corresponding author: Tran Thi Bien Thuy; Email: bienthuy@ttn.edu.